На правах рукописи

Фролов Николай Викторович

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНЫХ СИЛОВЫХ И СРЕДОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород 2020

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

Научный руководитель:	**Смоляго Геннадий Алексеевич** доктор технических наук, профессор, советник РААСН
Официальные оппоненты:	**Берлинов Михаил Васильевич** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры жилищно-коммунального комплекса ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» **Андросова Наталия Борисовна** кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой строительных конструкций и материалов ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (г. Санкт-Петербург)

Защита диссертации состоится «12» декабря 2020 г. в 12.30 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д999.094.03, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет», по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» http://www.swsu.ru.

Автореферат разослан « » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д-р техн. наук, доцент

Бакаева
Наталья Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы научных исследований. Опыт длительной эксплуатации несущих железобетонных конструкций показывает, что они обладают относительно высокой, но все же ограниченной долговечностью. При этом вследствие накопления повреждений бетона и стальной арматуры происходят случаи преждевременного прекращения эксплуатации конструкций, в том числе в виде их внезапного разрушения.

По действующим строительным нормам надежная работа железобетонных конструкций под нагрузкой в течение заданного периода времени обеспечивается выполнением расчетов по двум группам предельных состояний и назначением специальных мер защиты для соответствующих агрессивных сред при спланированной системе проведения ремонтов. Предполагается, что эксплуатация здания (сооружения) будет прекращена ранее исчерпания ресурса силового сопротивления основных несущих конструкций, но установить время наступления их предельного состояния с учетом накопления повреждений пока не представляется возможным.

Проблема оценки параметров долговечности как эксплуатируемых, так и вновь проектируемых железобетонных конструкций является проблемой прогнозирования их напряженно-деформированного состояния (НДС) во времени, которая на сегодня представляется одной из приоритетных в научных исследованиях и практике строительства. Ее решение должно осуществляться на основе системного подхода с учетом всех факторов, воздействующих на конструкции.

К снижению прочности и повышению деформативности железобетонных конструкций приводят зачастую необратимые физико-химические изменения свойств материалов вследствие развития различных деградационных процессов, вызванных совместным длительным воздействием внешней нагрузки и агрессивной эксплуатационной среды.

В связи с этим, научный интерес представляют экспериментально-теоретические исследования прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов при длительных силовых и средовых воздействиях. Принимая во внимание широкую распространенность изгибаемых железобетонных элементов в конструктивных системах зданий и сооружений, можно заключить, что выбранная тема научных исследований своевременна и актуальна.

Степень разработанности темы исследований. Несмотря на достаточно широкие исследования изгибаемых железобетонных элементов при различных режимах эксплуатации, представленные в публикациях Н.Б. Андросовой, В.Н. Байкова, М.В. Берлинова, В.М. Бондаренко, А.И. Васильева, А.А. Гвоздева, Г.А. Гениева, А.Б. Голышева, Е.А. Гузеева, В.Т. Ерофеева, А.С. Залесова, Н.И. Карпенко, В.И. Колчунова, Вл.И. Колчунова, Е.А. Король, Е.А. Ларионова, Л.Р.

Маиляна, В.М. Митасова, В.И. Морозова, Г.В. Мурашкина, Т.А. Мухамедиева, И.Г. Овчинникова, В.С. Плевкова, А.И. Попеско, В.И. Римшина, Р.С. Санжаровского, В.П. Селяева, Г.А. Смоляго, В.Ф. Степановой, А.Г. Тамразяна, В.И. Травуша, Н.Н. Трекина, А.А. Трещева, В.В. Тура, В.С. Федорова, Н.В. Федоровой, R. François, M.G. Stewart, T. Topper, K. Willam и др., далеко не все особенности их напряженно-деформированного состояния изучены при совместном проявлении длительных силовых и средовых воздействий.

Малоизученность задач совместного проявления силового и средового сопротивления железобетона как в предельных, так и запредельных состояниях подчеркивается В.М. Бондаренко и В.И. Колчуновым в статье «Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях» (ПГС. 2013. №2. С. 28-31.), где также обозначена необходимость разработки расчетных моделей и проведения исследований по кинетике неравновесных процессов развития коррозионных повреждений в нагруженных железобетонных конструкциях.

В работах Н.И. Карпенко установлено, что деградация свойств конструкционных материалов наиболее полно поддается учету в деформационной расчетной модели путем корректировки соответствующих диаграмм деформирования и размеров поперечных сечений.

В большинстве своем существующие методики расчета на основе деформационной модели дают возможность определять прочность или (намного реже) деформативность изгибаемых железобетонных элементов только с коррозионными повреждениями продольной арматуры и бетона сжатой зоны. За рамками рассмотрения остаются повреждения бетона в растянутой зоне и у боковых граней сечения. При этом используется линейная, и даже равномерная эпюра повреждений бетона для всех сечений, что никак не может быть увязано как с разным уровнем распределения напряжений в различных сечениях элемента, так и с неравномерной концентрацией агрессивной среды в пределах пролета. Зачастую также во внимание не принимается такой важный временной фактор, как ползучесть бетона. Данные методики не позволяют с единых позиций достаточно строго и подробно отразить состояние изгибаемых железобетонных элементов при длительных силовых и средовых воздействиях.

Цель исследований – на основе нелинейной деформационной модели железобетона разработать и экспериментально обосновать методику расчета прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, подверженных совместным длительным силовым и средовым воздействиям.

Задачи научных исследований:

– разработать методику расчета прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов при длительных силовых и средовых воздействиях с учетом нелинейных диаграмм деформирования бетона, различных схем развития коррозионных повреждений в границах

поперечного сечения, а также различной степени поврежденности сечений в пределах пролета;

– по разработанной методике расчета составить алгоритм и написать программы расчета для ЭВМ;

– провести экспериментальные исследования прочности и деформативности специальных образцов изгибаемых железобетонных элементов, находившихся длительное время под нагрузкой в лабораторных (сульфат- и хлоридсодержащих) и реальных эксплуатационных средах;

– осуществить апробацию разработанной методики расчета путем сравнения теоретических и экспериментальных данных по прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов при длительных силовых и средовых воздействиях, в т.ч. их сравнения с данными, полученными с применением других методик и исследований других авторов;

– выполнить численные исследования прочности, деформативности и остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с учетом их конструктивных особенностей и проявления различных эксплуатационных факторов.

Объект исследования – изгибаемые железобетонные элементы, подверженные длительным силовым и средовым воздействиям.

Предмет исследования – прочностные и деформативные характеристики изгибаемых железобетонных элементов, находившихся длительное время под статической нагрузкой в агрессивной среде.

Научную новизну работы составляют:

– методика и алгоритм расчета прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов при длительных силовых и средовых воздействиях, учитывающие нелинейные диаграммы деформирования бетона, различные схемы развития коррозионных повреждений материалов в границах поперечного сечения, а также различную степень поврежденности сечений в пределах пролета;

– экспериментальные данные о накоплении коррозионных повреждений бетона в сульфатсодержащей агрессивной среде, показавшие, что коэффициент повреждения поверхностного слоя бетона в переходной зоне не принимает значение равное нулю (по проведенным оценкам его минимальное значение составляет 0,15-0,2); развитие повреждений имеет затухающий с течением времени характер и зависит от знака и уровня действующих в бетоне напряжений;

– экспериментальные данные о накоплении коррозионных повреждений стальной арматуры классов А240 и А500 в хлоридсодержащей агрессивной среде, показавшие, что при полной нейтрализации защитных свойств бетона повреждения (питтинги) наибольшей глубины могут образовываться на поверхности арматурного стрежня обратной по отношению к ближайшей грани сечения элемента;

– новые экспериментальные данные о прочности и деформативности образцов железобетонных балок, находившихся длительное время под нагрузкой в лабораторных (сульфат- и хлоридсодержащих) и реальных эксплуатационных средах; образцов балок, содержащих в растянутой зоне коррозионностойкую стеклопластиковую арматуру.

Теоретическая значимость работы. Изучены особенности накопления коррозионных повреждений бетона и стальной арматуры, снижения прочности и повышения деформативности изгибаемых железобетонных элементов, подверженных длительным силовым и средовым воздействиям.

Практическая значимость работы. Разработанные методика и алгоритм расчета и реализованные на их основе программы для ЭВМ позволяют осуществлять прогнозирование во времени прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов с учетом проявления различных эксплуатационных факторов, что в итоге позволяет оценивать остаточный ресурс указанных элементов по каждой группе предельных состояний.

Методология и методы исследования. При выполнении теоретических исследований применялись аналитические методы сопротивления материалов, строительной механики и нелинейной теории железобетона. В ходе экспериментальных исследований использовались методы натурного физико-механического моделирования строительных конструкций, а при обработке полученных результатов – методы математической статистики.

Положения, выносимые автором на защиту:

– методика и алгоритм расчета прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов при совместных длительных силовых и средовых воздействиях;

– экспериментальные данные о накоплении коррозионных повреждений бетона и стальной арматуры в сульфат- и хлоридсодержащих агрессивных средах с учетом знака и уровня действующих напряжений;

– результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности образцов железобетонных балок, находившихся длительное время под нагрузкой в лабораторных (сульфат- и хлоридсодержащих) и реальных эксплуатационных средах; образцов балок, имеющих в растянутой зоне коррозионностойкую стеклопластиковую арматуру;

– результаты численных исследований прочности, деформативности и остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с учетом их конструктивных особенностей и проявления различных эксплуатационных факторов.

Достоверность результатов работы обеспечивается согласованностью с базовыми положениями строительной механики и

нелинейной теории железобетона, удовлетворительным совпадением результатов расчета по разработанной методике с результатами проведенных экспериментальных исследований, а также с экспериментальными данными, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований были представлены: - на Международных академических чтениях «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения» (г. **Курск**, 2017); - Международной научно-практической конференции «Лолейтовские чтения – 150. Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям» (г. **Москва**, 2018); - I Международной и III Всероссийской научно-практических конференциях «Безопасный и комфортный город» (г. **Орел**, 2017, 2019); - III Международной научно-практической конференции «Наука и инновации в строительстве» (г. **Белгород**, 2019); - Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений» (г. **Курск**, 2019).

В полном объеме работа была представлена и одобрена 17 марта 2020 г. на научном семинаре и 15 сентября 2020 г. на расширенном заседании кафедры строительства и городского хозяйства ФГБОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова» (г. Белгород).

Публикации. По теме научных исследований было опубликовано 11 статей, из них 4 в журналах, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России, 1 в издании, входящем в международную базу данных Scopus. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка используемой литературы и трех приложений. Диссертация изложена на 188 страницах и содержит 173 страницы основного текста, 32 таблицы, 52 рисунка, 190 источников в списке литературы, в том числе 46 иностранных.

Содержание диссертации соответствует пунктам 3 и 4 области исследований Паспорта научной специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и проанализирована степень разработанности темы научных исследований, представлены цель и задачи работы, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен критический обзор результатов имеющихся экспериментально-теоретических исследований изгибаемых железобетонных элементов, подверженных длительным силовым и средовым воздействиям.

Рассмотрены основные модели состояния бетона, арматуры и их сцепления в нагруженных изгибаемых железобетонных элементах при агрессивном воздействии эксплуатационной среды, связанные с описанием

кинетики развития коррозионных повреждений конструкционных материалов, а также нелинейности, неравновесности и частичной необратимости деформирования, набора прочности и ползучести бетона.

Выполнен анализ основных расчетных моделей силового и средового сопротивления железобетонных конструкций, изучены их предпосылки, положительные и отрицательные стороны. Отмечается, что многие методики расчета были разработаны до прихода компьютерных технологий. Отсутствие мощных вычислительных инструментов вынуждало идти путем разработки и развития так называемых инженерных методик расчета. Однако такой путь вел к фрагментарности решений, разбиению области определения на ряд участков с различными моделями и решениями, загруженностью эмпирическими коэффициентами и необходимостью их корректировки при расширении видов материалов и накоплении информации по их работе. Также отмечается, что при разработке методик расчета изгибаемых железобетонных элементов сложилась тенденция разделения моделей при расчете по первой и второй группе предельных состояний.

Помимо этого, рассмотрены основные подходы к оценке остаточного ресурса коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов.

Во второй главе приведена методика расчета прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, подверженных длительным силовым и средовым воздействиям, основанная на нелинейной деформационной модели железобетона с учетом следующих предпосылок, рабочих гипотез и допущений:

– В расчете принимается нормальное сечение, напряженно-деформированное состояние которого соответствует усредненному состоянию блока между трещинами;

– При всех уровнях нагружения элемента для рассматриваемого сечения остается справедливой гипотеза плоских сечений;

– Принимается кинетическая устойчивость неравновесных процессов продвижения коррозионных повреждений и развития деформаций ползучести бетона;

– Рассматриваются только кольматационные (при параметре кинетики m = 1) коррозионные повреждения бетона согласно кинетической модели В.М. Бондаренко, мерой которых в расчете выступают: глубина повреждения, определяемая по выражению

$$\delta\left(t,t_0\right)=\left(1-\Delta\delta\left(t,t_0\right)\cdot e^{-\alpha(t-t_0)}\right)\delta_{кр}(t_0)\,, \qquad (1)$$

и функция коэффициента повреждения бетона $K^*(z)$, устанавливаемая из граничных условий согласно рисунку 1. Для слоя бетона, контактирующего с внешней агрессивной средой (z = 0), функция принимает минимальное значение $K^*_{=\min}$; для слоя бетона, находящегося на глубине $z = \delta(t, t_0)$ от грани сечения элемента, функция принимает значение равное 1.

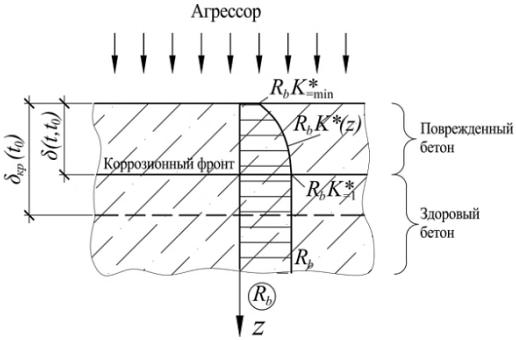


Рисунок 1 – Изменение характеристик бетона по глубине сечения

– Коррозионные повреждения стальной арматуры учитываются уменьшением расчетной площади ее поперечного сечения по формуле

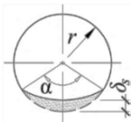
$$A_s^* = A_s - A_s^{cor}, \qquad (2)$$

где A_s^{cor} – утраченная площадь, определяемая по таблице 1 в зависимости от модели износа арматурных стержней; глубина повреждений арматуры определяется по формуле (3), предложенной Л.Я. Цикерманом.

$$\delta_s(t) = \begin{cases} 0, & t \le t_{inc} \\ \dfrac{\delta_{s,0} \cdot (t - t_{inc})}{T + (t - t_{inc})}, & t > t_{inc} \end{cases}, \qquad (3)$$

где t_{inc} – время инициирования коррозии стальной арматуры, определяемое из выражения (1) при глубине повреждений бетона равной толщине защитного слоя;

Таблица 1 – Модели коррозионного износа арматурных стержней

Модель коррозионного износа стержня		Поперечное сечение арматурного стержня	
		Расчетная схема	Расчетная площадь коррозионного повреждения A_s^{cor}
Сплошная равномерная коррозия			$\pi\delta_s(2r - \delta_s)$
Неравномерная коррозия	Язвенная коррозия		$\delta_s^2\sqrt{m - m^2} + \delta_s^2 \arcsin\sqrt{m} - 2r\delta_s\sqrt{m} + \delta_s\sqrt{mr^2 - \delta_s^2 m^2} + r^2 \arcsin\dfrac{\delta_s\sqrt{m}}{r}$, где $m = 1 - \delta_s^2 / 4r^2$
	Плоский фронт		$(\delta_s - r)\sqrt{2r\delta_s - \delta_s^2} + r^2 \arcsin\dfrac{\sqrt{2r\delta_s - \delta_s^2}}{r}$
	Серповидный фронт		$\dfrac{r^2}{2}(\alpha - \sin\alpha) + \dfrac{(2r - \delta_s)^2}{2}\left(\dfrac{\alpha}{2} - \sin\dfrac{a}{2}\right)$, где $\alpha = 4\arccos\left(1 - \dfrac{\delta_s}{2r}\right)$

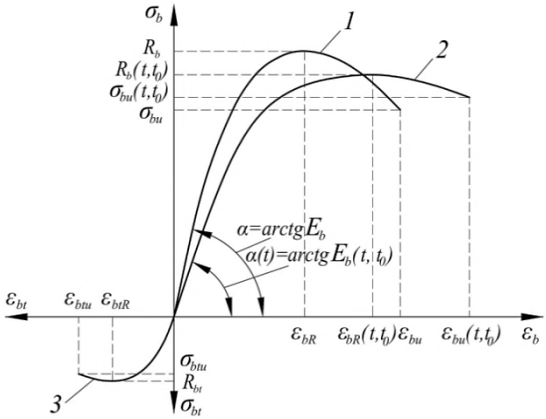


Рисунок 2 – Диаграммы деформирование бетона при кратковременном (*1, 3*) и длительном (*2*) нагружении

– Диаграммы деформирования бетона (рисунок 2) описываются степенным полиномом вида

$$\sigma_b = \sum_{k=1}^{n} a_k \varepsilon_b^k , \qquad (4)$$

где a_k – коэффициенты полинома, устанавливаемые экспериментальным или расчетным способом; k – показатель степени (принят равным 5). В качестве исходных принимаются диаграммы при кратковременном режиме нагружения. С их помощью, основываясь на инвариантности удельной потенциальной энергии деформирования бетона в характерных состояниях, определяются параметры диаграмм состояния бетона при длительном режиме нагружения.

Изменение параметров диаграмм деформирования бетона вследствие коррозии учитывается с помощью коэффициента повреждения K^*.

– После достижения деформаций растяжения бетона своих предельных значений ε_{btu} эпюра растягивающих напряжений приобретает форму с ординатой $\psi_{bt}R_{bt}$, где коэффициент ψ_{bt} учитывает постепенное снижение силового сопротивления бетона растянутой зоны.

– Диаграммы деформирования стальной арматуры описываются кусочно-линейной функцией.

Определение напряженно-деформированного состояния нормального сечения для общего случая его повреждения ведется с учетом рисунка 3.

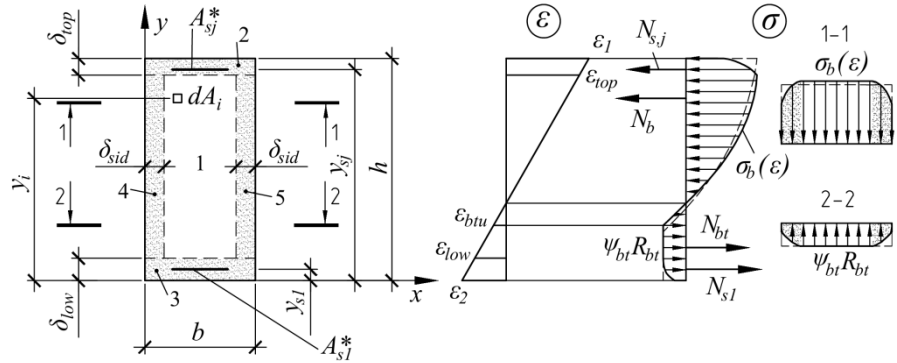


Рисунок 3 – Напряженно-деформированное состояние нормального сечения

Уравнения равновесия усилий в сечении записаны в следующем виде

$$\int_A \sigma_b dA + \sum_{j=1}^{m} \sigma_{sj} A_{sj}^* = 0; \qquad (5)$$

$$\int_A \sigma_b y dA + \sum_{j=1}^{m} \sigma_{sj} A_{sj}^* y_{sj} - M = 0, \qquad (6)$$

где: σ_b – напряжение в бетоне элементарной площадки dA, расположенной на расстоянии y от нижней грани сечения элемента; σ_{sj}, A_{sj}*, y_{sj} – соответственно напряжения в j-ом стрежне стальной арматуры, его площадь в рассматриваемый момент времени и расстояние от центра тяжести сечения стержня до нижней грани сечения элемента; M – изгибающий момент.

В границах прямоугольного сечения элемента (рисунок 3) выделяется один участок со здоровым бетоном (№1), окруженный возможными четырьмя участками с поврежденным бетоном – по участку у верхней (№2) и нижней (№3) граней, а также два участка, заключенных между ними у боковых граней (№4 = №5).

В результате преобразований уравнений (5-6) с учетом диаграмм деформирования бетона (4) получены уравнения, описывающие напряженно-деформированное состояние сечения изгибаемого железобетонного элемента без трещин, а также когда трещины образуются и развиваются по высоте сечения сначала в поврежденном и далее в здоровом бетоне растянутой зоны. В общем виде данные уравнения представлены следующим образом

$$\frac{h}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}\left(N_{b1}^{'} + N_{b2}^{'} + N_{b3}^{'} + 2N_{b4}^{'}\right) + \sum_{j=1}^{m} \sigma_{sj} A_{sj}^* = 0; \qquad (7)$$

$$\frac{h^2}{\left(\varepsilon_1 - \varepsilon_2\right)^2}\left(M_{b1}^{'} + M_{b2}^{'} + M_{b3}^{'} + 2M_{b4}^{'}\right) + \sum_{j=1}^{m} \sigma_{sj} A_{sj}^* y_{sj} - M = 0. \qquad (8)$$

Слагаемые N'_{bn} и M'_{bn} в уравнениях (7-8) определяются для каждого характерного участка сечения в зависимости от высоты развития нормальных трещин по выражениям, представленным в тексте диссертации. Напряжения в стальной арматуре устанавливаются по диаграммам ее деформирования с использованием гипотезы плоских сечений.

После представления деформаций бетона верхней грани через кривизну $\varepsilon_1 = \aleph h + \varepsilon_2$ в уравнении (7) неизвестными остаются $\aleph$ и ε_2. Определяя параметры напряженно-деформированного состояния сечения по заданным значениям кривизны $\aleph$, методом половинного деления находится значение ε_2 и ε_1. Далее, из уравнения (8) устанавливается действующий в сечении изгибающий момент M, а затем жесткость нормального сечения $B = M / \aleph$.

Отсутствие коррозионных повреждений у отдельных граней сечения описывается обнулением параметров повреждений конструкционных материалов на необходимых участках рисунка 3.

Статический расчет балки выполняется методом заданных деформаций с описанием изогнутой оси полиномом четвертой степени. В качестве нагрузочного параметра задается угол поворота на опоре, при котором определяется величина внешней нагрузки.

Балка по длине разбивается на n равных участков Δ (рисунок 4), для которых записаны следующие уравнения:

$$y = \sum_{i=1}^{5} A_i x^{i-1} \; ; \tag{9}$$

$$\varphi = \frac{dy}{dx} = \sum_{i=1}^{5} (i-1) A_i x^{i-2} \; ; \tag{10}$$

$$\aleph = \frac{d^2 y}{dx^2} = \sum_{i=1}^{5} (i-1)(i-2) A_i x^{i-3} \; ; \tag{11}$$

$$\frac{Q}{B} = \frac{d^3 y}{dx^3} = \sum_{i=1}^{5} (i-1)(i-2)(i-3) A_i x^{i-4} \; , \tag{12}$$

где: y, φ – соответственно прогиб и угол поворота изогнутой оси балки на расстоянии x от начала участка; $\aleph$ – кривизна в данной точке; Q – поперечная сила; A_i – коэффициенты полинома, определяемые методом начальных параметров.

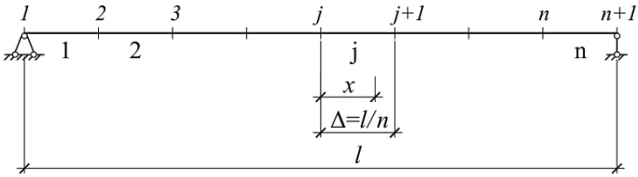


Рисунок 4 – Разбиение балки на участки и нумерация сечений

С учетом уравнений (9-12) устанавливается связь между внешней нагрузкой F и углом поворота на опоре φ_1 согласно выражению

$$F = \frac{n\Delta\varphi_1}{\sum_{k=2}^{n} \frac{(2k-2n-11) f_{Mk} \Delta^2}{2B_k} + \sum_{m=2}^{n+1} \frac{(4m-4n-5) f_{Qm}{}^{L} \Delta^3}{24B_m} + \sum_{s=1}^{n} \frac{(8s-8n-3) f_{Qs}{}^{R} \Delta^3}{24B_s}} \; . \tag{13}$$

Затем с учетом жесткостей сечений, полученных при определении напряженно деформированного состояния, определяются прогибы, кривизны, деформации бетона и арматуры в сечениях балки.

Представленная методика позволяет выполнять расчет изгибаемых железобетонных элементов, в том числе и с учетом неравномерных коррозионных повреждений сечений по длине пролета.

Остаточный ресурс изгибаемых железобетонных элементов определяется периодом наработки T, за который произойдет исчерпание их запаса по прочности или по деформативности.

Использование в предлагаемой методике расчета метода заданных деформаций в сочетании с определением величины момента по заданной

кривизне при определении НДС сечений позволило организовать устойчивый итерационный процесс для расчета изгибаемых железобетонных элементов на всех стадиях, в том числе и в запредельной стадии работы.

По разработанной методике был составлен алгоритм расчета и написаны программы для расчета прочности, деформативности и остаточного ресурса на ЭВМ, на которые получены свидетельства о государственной регистрации [12, 13].

В третьей главе представлена цель и сформулированы задачи экспериментальных исследований, на основе которых были разработаны программа и методика проведения испытаний опытных образцов. Приведены основные результаты и их анализ.

Главной целью проведения экспериментальных исследований являлось получение опытных данных по накоплению во времени коррозионных повреждений бетона и стальной арматуры и их влиянию на прочность и деформативность изгибаемых железобетонных элементов.

В дополнение к этому, с целью повышения долговечности изгибаемых железобетонных элементов в агрессивных средах экспериментально исследована эффективность замены у них растянутой стальной арматуры на коррозионностойкую стеклопластиковую арматуру.

В программу экспериментальных исследований включены образцы следующих видов изгибаемых элементов:

1. Железобетонные балки, находившиеся до 3-х лет под нагрузкой в лабораторных сульфат- и хлоридсодержащих агрессивных средах (27 шт., основной эксперимент);

2. Несущие железобетонные перемычки, находившиеся на протяжении 52-х лет в условиях реальных климатических воздействий Белгородской области (7 шт.). Основные сведения по данным образцам, методике их испытаний и полученных при этом результатах представлены в публикации [2] и тексте диссертации;

3. Балки с различным содержанием в растянутой зоне стеклопластиковой арматуры (8 шт.). Основные сведения по данным образцам, методике их испытаний и полученных при этом результатах представлены в публикации [7] и тексте диссертации.

В ходе экспериментальных исследований выполнялись следующие виды контрольных испытаний:

– испытания вспомогательных образцов бетона и арматуры с целью определения их физико-механических характеристик;

– испытания образцов железобетонных балок при длительном действии внешней нагрузки и агрессивной среды (длительные испытания);

– испытания всех образцов изгибаемых железобетонных элементов кратковременной нагрузкой на изгиб до разрушения с оценкой накопленных за время эксплуатации коррозионных повреждений материалов.

Железобетонные балки, предназначенные для длительных испытаний сроком до 3-х лет в лабораторных агрессивных средах, были изготовлены прямоугольного сечения 60x100(h) мм с расчетным пролетом l_0 = 1400 мм.

После изготовления все образцы хранились 28 суток в помещении с нормальным температурно-влажностным режимом, после чего они были разделены на одну контрольную (11 шт.) и две основные (по 8 шт.) группы балок-близнецов (таблица 2).

Таблица 2 – Маркировка образцов железобетонных балок и номера серий их испытаний нагрузкой до разрушения

Группа образцов	Вид среды	Маркировка образцов железобетонных балок с учетом длительности силовых и средовых воздействий и номера серии испытаний кратковременной нагрузкой до разрушения				
		0 сут., серия №1	180 сут., серия №2	360 сут., серия №3	720 сут., серия №4	1080 сут., серия №5
Контрольная (БК)	Неагрессивная среда	БК-0-1 БК-0-2 БК-0-3	БК-180-1 БК-180-2	БК-360-1 БК-360-2	БК-720-1 БК-720-2	БК-1080-1 БК-1080-2
Основная №1 (БОС)	Сульфатная агрессивная среда	–	БОС-180-1 БОС-180-2	БОС-360-1 БОС-360-2	БОС-720-1 БОС-720-2	БОС-1080-1 БОС-1080-2
Основная №2 (БОХ)	Хлоридная агрессивная среда	–	БОХ-180-1 БОХ-180-2	БОХ-360-1 БОХ-360-2	БОХ-720-1 БОХ-720-2	БОХ-1080-1 БОХ-1080-2
Количество образцов в серии		3	6	6	6	6

Армирование железобетонных балок выполнено плоскими одиночными каркасами, состоящими из продольной растянутой и сжатой арматуры соответственно Ø8А240 и Ø4В500 с защитным слоем бетона 10 мм, а также поперечной арматуры Ø3А240 в виде хомутов, установленных с постоянным шагом 40 мм во избежание разрушения балок по наклонным сечениям (рисунок 5). Гладкий профиль арматуры в балках принят в целях более точного установления геометрических параметров ее коррозионных повреждений. Бетон принят класса по прочности на сжатие В20.

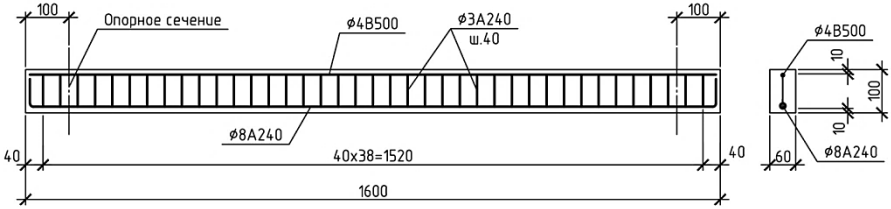


Рисунок 5 – Схема армирования железобетонных балок

Для определения деформативно-прочностных характеристик бетона вместе с балками были изготовлены вспомогательные образцы бетонных кубов 100x100x100 мм и призм 100x100x400. Кроме того, предусматривались вспомогательные образцы стержней стальной арматуры Ø8А240 и Ø8А500, которые были обетонированы с созданием искусственных трещин шириной

раскрытия 0,2 мм шагом 100 мм и варьированием толщины защитного слоя бетона 10 и 20 мм.

Сначала путем проведения первой серии испытаний железобетонных балок кратковременной нагрузкой на изгиб до разрушения, включавшей три образца из контрольной группы, была установлена величина разрушающей нагрузки $P_u^{БК\text{-}0}$. После этого согласно рисунку 6 оставшиеся балки с помощью гидродомкрата *4*, стальных траверс *3* и рамки *2* были попарно стянуты между собой усилием равным $0.6P_u^{БК\text{-}0}$, которое в ходе длительных испытаний удерживалось тяжами *5*. Контроль величины усилия выполнялся с помощью образцового динамометра сжатия *6*. Передача усилия на тяжи и, следовательно, на балки *1* осуществлялась посредствам поэтапного закручивания гаек на концах тяжей динамометрическим ключом с увеличением момента затяжки до начала снижения показаний на динамометре или увеличения общего прогиба балок на 0,01 мм, оцениваемого индикатором часового типа *7*. Падение заданного усилия, вследствие проявлений процессов коррозии и ползучести, периодически восполнялось. Для этого на балки устанавливались элементы *2*, *3*, *4*, *6*, *7* и гидродомкратом вновь создавалось усилие $0.6P_u^{БК\text{-}0}$, которое далее также удерживалось тяжами, и контролировались прогибы балок.

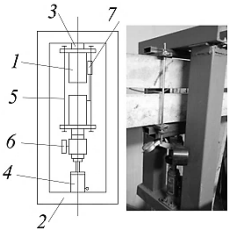


Рисунок 6 – Схема нагружения балок

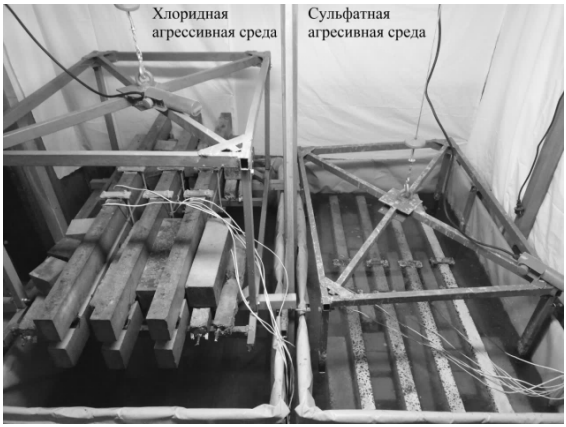


Рисунок 7 – Стенд для длительных испытаний образцов

Для инициирования развития коррозионных процессов в бетоне и стальной арматуре был изготовлен специальный стенд для длительных испытаний (рисунок 7), основными элементами которого являлись две коррозионностойкие полимерные ванны с разными жидкостями. Одна ванна, в которой находился 2%-й водный раствор серной кислоты (H_2SO_4), была предназначена для моделирования воздействия сульфатной агрессивной среды на образцы основной группы №1. Другая ванна, в которой находилась дистиллированная вода, была предназначена для моделирования воздействия хлоридной агрессивной среды на образцы основной группы №2, содержащих в бетоне добавку хлорида натрия (NaCl) до 5% от массы цемента. Нагруженные

образцы каждый день на 15-20 минут опускали в ванны с жидкостями для увлажнения, после чего их поднимали и оставляли высыхать в условиях, при которых хранились образцы контрольной группы. Плотности жидкостей в ходе эксперимента были постоянными и контролировались ареометром. Все металлические элементы на железобетонных балках, обеспечивающие неизменность расчетной схемы и величины нагрузки, были покрыты антикоррозионными составами.

Расчетные схемы железобетонных балок при длительных испытаниях и испытаниях кратковременной нагрузкой до разрушения были одинаковы: однопролетная шарнирно-опертая балка, загруженная двумя сосредоточенными силами, приложенными на расстоянии 585 мм от опор.

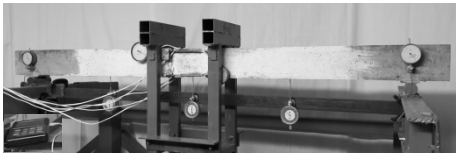


Рисунок 8 – Испытание железобетонной балки на изгиб до разрушения

По окончании длительных испытаний и разгрузке балок измерялись остаточные значения характеристик деформирования, масса, размеры сечений, определялась прочность бетона. Далее образцы были испытаны кратковременной нагрузкой на изгиб до разрушения (рисунок 8), с последующим установлением параметров коррозионных повреждений конструкционных материалов. Нагружение балок выполнялось с использованием штучных грузов, массы которых определялись на весах с дискретой 1 г. В ходе испытаний у железобетонных балок контролировалось развитие прогибов в различных точках пролета индикаторами часового типа с ценой деления шкалы 0,01 мм, развитие деформаций бетона и растянутой арматуры в зоне чистого изгиба тензорезисторами и механическими тензометрами, в основе которых находились индикаторы часового типа с ценой деления шкалы 0,001 мм.

Результаты исследований состояния бетона приведены в таблице 3.

Под воздействием сульфатсодержащей среды коррозия бетона протекала по третьему виду согласно схеме, имеющей три зоны с различной степенью деструкции. При этом в переходной зоне, где силовое сопротивление композита частично сохранено, коэффициент повреждения поверхностного слоя бетона не принимает значение, равное нулю. С учетом анализа результатов похожих экспериментальных исследований (Е.А. Гузеева и др.) установлено, что минимальное значение K^* может составлять 0,15-0,2. Под воздействием хлоридсодержащей среды коррозия бетона протекала по первому виду согласно схеме без его полного разрушения. Глубина коррозионных повреждений бетона определялась индикаторным методом с использованием 1-% спиртового раствора фенолфталеина. Ее изменение с течением времени показано на рисунке 9. Отмечается, что развитие повреждений бетона в рассматриваемых агрессивных средах имеет затухающий характер и зависит от знака и уровня действующих напряжений.

Инициирование коррозии стальной арматуры произошло только в железобетонных балках и обетонированных образцах с защитным слоем 10 мм под воздействием хлоридной среды. Повреждения стержней соответствуют моделям неравномерной коррозии (таблица 1). Установлено, что при полной нейтрализации защитных свойств бетона коррозионные повреждения (питтинги) наибольшей глубины могут образовываться на поверхности стержня обратной по отношению к ближайшей грани сечения железобетонного элемента. Это обусловлено электрохимическими процессами, происходящими при попеременном увлажнении и высыхании образцов. Изменение глубины повреждений стальной арматуры с течением времени показано на рисунке 10.

Таблица 3 – Основные результаты исследований состояния бетона

Характеристики бетона	Эксплуатационная среда	Длительность воздействий t, сут.				
		0	180	360	720	1080
Прочность на сжатие R_b, МПа	Неагрессивная	23.8	30.4	30.7	30.9	31.0
	Сульфатная		23.7	22.7	21.5	20.6
	Хлоридная		29.6	29.9	30.0	29.7
Начальный модуль упругости E_b, МПа	Неагрессивная	30000	35500	35500	36000	36000
	Сульфатная		30500	30000	29500	29000
	Хлоридная		34000	34000	34500	34100
Деформации ε_{bR}	Неагрессивная	0.00180	0.00190	0.00193	0.00195	0.00195
	Сульфатная		0.00190	0.00195	0.00200	0.00205
	Хлоридная		0.00195	0.00200	0.00205	0.00210
Деформации ползучести верх. грани $\varepsilon_{c,1}$ $(t, 0)$	Неагрессивная	-	0.00094	0.00109	0.00115	0.00116
	Сульфатная		0.00113	0.00131	0.00135	0.00139
	Хлоридная		0.00098	0.00114	0.00119	0.00122

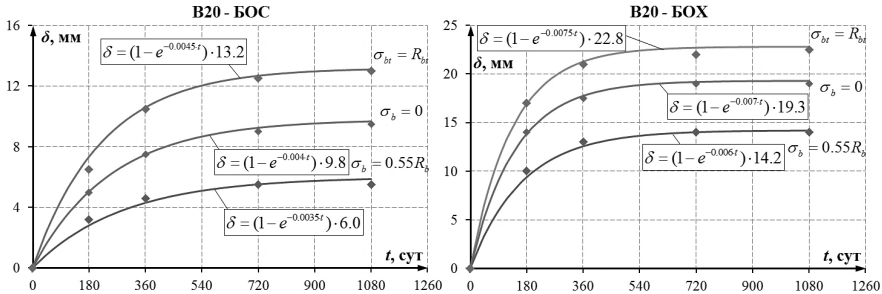


Рисунок 9 – Изменение глубины коррозионных повреждений бетона

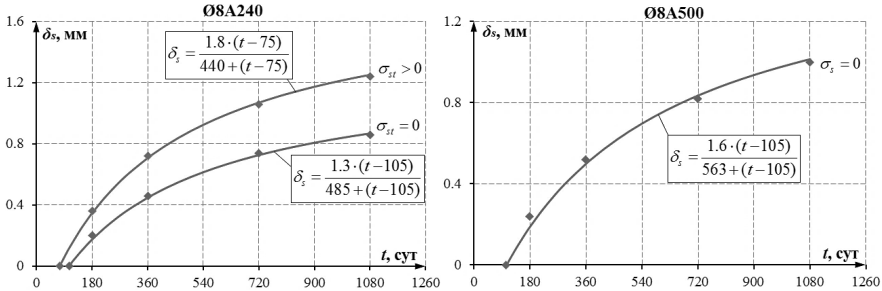


Рисунок 10 – Изменение глубины коррозионных повреждений стальной арматуры

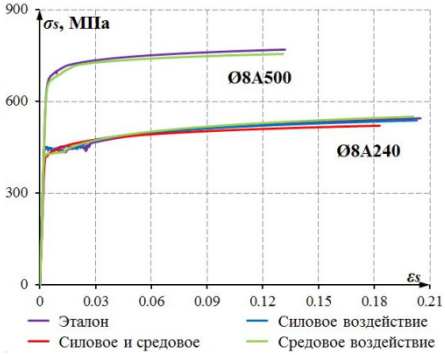


Рисунок 11 – Диаграммы деформирования стальной арматуры

Диаграммы деформирования стальной арматуры показаны на рисунке 11. Деформативно-прочностные характеристики всей арматуры остались в пределах вариаций соответствующих параметров эталонных образцов, за исключением арматуры класса А240, у которой после силовых и средовых воздействий сократилась длина площадки текучести.

Основные сведения по результатам испытаний балок представлены в таблицах 4 и 5.

Разрушение всех балок при испытаниях произошло в зоне чистого изгиба по нормальным сечениям. Для образцов основных групп свойственно снижение прочности при увеличении срока силовых и средовых воздействий. После 1080 сут. для балок, находившихся в сульфат- и хлоридсодержащих агрессивных средах, при сопоставлении с контрольными балками этого же времени прочность была меньше соответственно на 6.2% и 11.6%.

Наиболее интенсивное увеличение прогибов балок $\overline{f_{0.6}}^{\exp}$ от длительного действия нагрузки $0.6P_u^{\text{БК-0}}$ наблюдалось в первый год испытаний (длительное деформирование); в дальнейшем прирост прогибов носил затухающий характер. Прогибы балок, находившихся в сульфат- и хлоридсодержащих агрессивных средах, были больше прогибов контрольных балок на протяжении всего периода наблюдений, разница составляла соответственно: 4.4% и 2.9% на 180 сут.; 9.5% и 6.0% на 360 сут.; 11.1% и 8.0% на 360 сут.; 11.8% и 11.8% на 1080 сут. После снятия длительной нагрузки все образцы имели остаточные прогибы, данные по которым приведены в тексте диссертации. Значения прогибов балок $\overline{f_{0.7}}^{\exp}$ в таблице 5 определены при уровне кратковременной нагрузки $0.7P_u^{\text{БК-0}}$ при испытаниях до разрушения.

В четвертой главе приведены численные исследования изгибаемых железобетонных элементов, подверженных длительным силовым и средовым воздействиям, по разработанной методике и сопоставление результатов расчетов с опытными данными, в том числе и других авторов.

Показано, что все предпосылки и рабочие гипотезы, заложенные в методику расчета, не противоречат явлениям, наблюдаемым в эксперименте.

В результате сравнения опытных и расчетных данных (таблицы 4 и 5) установлено, что предлагаемая методика позволяет более точно определять параметры прочности и деформативности образцов железобетонных балок, использованных в экспериментальных исследованиях, нежели чем инженерные методики, основанные на нормах проектирования.

Таблица 4 – Сравнение опытных и расчетных данных по прочности балок

Марка образцов	Прочность нормального сечения M_u, кН·м				
	Среднее опытное значение $\overline{M_u^{exp}}$	Расчетные значения			
		По инженерной методике на основе СП63		По предлагаемой методике	
		$M_u^{th,1}$	Отклонение, %	$M_u^{th,2}$	Отклонение, %
Неагрессивная среда (образцы контрольной группы)					
БК-0	1.837	1.721	-6.3	1.800	-2.0
БК-180	1.864	1.740	-6.7	1.844	-1.1
БК-360	1.866	1.741	-6.7	1.846	-1.1
БК-720	1.870	1.742	-6.8	1.848	-1.2
БК-1080	1.873	1.742	-7.0	1.849	-1.3
Сульфатная среда (образцы основной группы №1)					
БОС-180	1.816	1.686	-7.2	1.772	-2.4
БОС-360	1.790	1.671	-6.6	1.754	-2.0
БОС-720	1.769	1.663	-6.0	1.745	-1.4
БОС-1080	1.756	1.658	-5.6	1.739	-1.0
Хлоридная среда (образцы основной группы №2)					
БОХ-180	1.818	1.685	-7.3	1.796	-1.2
БОХ-360	1.764	1.639	-7.1	1.730	-1.9
БОХ-720	1.713	1.589	-7.2	1.679	-2.0
БОХ-1080	1.655	1.550	-6.3	1.632	-1.4
Среднее отклонение по всем образцам, %			-6.7		-1.5
Среднеквадратическое отклонение			0.51		0.46

Таблица 5 – Сравнение опытных и расчетных данных по деформативности балок

Марка образцов	Прогиб в середине пролета f, мм				
	Среднее опытное значение	Расчетные значения			
		По инженерной методике на основе СП63		По предлагаемой методике	
	$\overline{f_{0.6}^{exp}}$ / $\overline{f_{0.7}^{exp}}$	$f_{0.6}^{th1}$ / $f_{0.7}^{th1}$	Отклонение, %	$f_{0.6}^{th2}$ / $f_{0.7}^{th2}$	Отклонение, %
Неагрессивная среда (контрольная группа)					
БК-0-	4.38 / 5.45	4.56 / 5.48	+4.1 / +0.6	4.44 / 5.38	+1.4 / -1.3
БК-180	5.49 / 6.22	5.13 / 6.00	-6.6 / -3.5	5.41 / 6.31	-1.7 / +1.4
БК-360	5.66 / 6.35	5.11 / 5.99	-9.7 / -5.7	5.60 / 6.54	-1.1 / +3.0
БК-720	5.77 / 6.45	5.10 / 5.98	-11.7 / -7.3	5.74 / 6.64	-0.5 / +2.9
БК-1080	5.83 / 6.51	5.10 / 5.97	-12.5 / -8.3	5.79 / 6.70	-0.7 / +2.9
Сульфатная среда (основная группа №1)					
БОС-180	5.73 / 6.34	5.57 / 6.45	-2.8 / +1.7	5.82 / 6.75	+1.6 / +6.4
БОС-360	6.20 / 6.94	5.73 / 6.63	-7.6 / -4.5	6.34 / 7.32	+2.3 / +5.5
БОС-720	6.41 / 7.13	5.87 / 6.78	-8.4 / -5.0	6.64 / 7.60	+3.6 / +6.6
БОС-1080	6.52 / 7.23	5.93 / 6.85	-9.1 / -5.3	6.77 / 7.73	+3.8 / +6.9
Хлоридная среда (основная группа №2)					
БОХ-180	5.65 / 6.17	5.20 /6.09	-8.0 / -1.3	5.52 / 6.42	-2.3 / +4.1
БОХ-360	6.00 / 6.57	5.33 / 6.24	-11.2 / -5.0	5.93 / 6.85	-1.2 / +4.3
БОХ-720	6.23 / 6.91	5.47 / 6.41	-12.2 / -7.2	6.26 / 7.22	+0.5 / +4.5
БОХ-1080	6.52 / 7.09	5.59 / 6.55	-14.3 / -7.6	6.46 / 7.46	-0.9 / +5.2
Среднее отклонение по всем образцам, %			-8.5 / -4.5		+0.4 / +4.0
Среднеквадратическое отклонение			4.82 / 3.13		2.00 / 2.30

В случае расчета балок по разработанной методике максимальные отклонения составляют: по прочности -2,4%, по прогибам -2,3% ... +6,9%. В случае расчета балок по инженерным методикам максимальные отклонения составляют: по прочности -7,3%; по прогибам -14,3% ... + 4,1%.

С целью прогнозирования дальнейшего изменения прочности и деформативности, а также оценки остаточного ресурса произведены расчеты образцов железобетонных балок при длительности действия на них нагрузки и агрессивной среды на протяжении 2160 суток (рисунок 12).

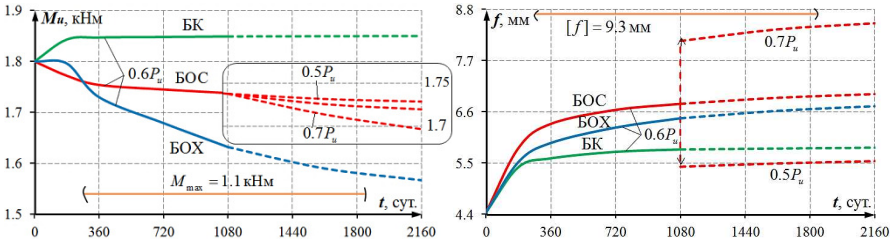


Рисунок 12 – Изменение прочности и деформативности балок (прерывистыми кривыми обозначены прогнозируемые значения)

Установлено, что в течение дальнейшей эксплуатации до 2160 суток при заданных силовых и средовых воздействиях ни одно из предельных состояний для железобетонных балок по рассматриваемым критериям не наступит, а их остаточный ресурс превышает прогнозируемый период.

Кроме этого, было выполнено сравнение опытных и расчетных данных по прочности и деформативности образцов изгибаемых железобетонных элементов, использованных в экспериментальных исследованиях А.И. Попеско, А.А. Пищулева и др., результаты которого также подтвердили приемлемую точность вычислений по предлагаемой методике.

По результатам проведенных исследований составлены практические рекомендации по прогнозированию прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями и оценке их остаточного ресурса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Эксплуатация многих железобетонных конструкций под нагрузкой длительное время проходит при воздействии технологических и природных агрессивных сред, вызывающих развитие различных деградационных процессов, приводящих к накоплению необратимых повреждений бетона и стальной арматуры и, как следствие, к снижению прочности и повышению деформативности конструкций до наступления предельных состояний, не достигнув в ряде случаев нормативного срока службы.

2. С использованием общепринятых положений нелинейной деформационной модели сопротивления железобетона разработаны методика, алгоритм и программы расчета прочности и деформативности

изгибаемых железобетонных элементов при длительных силовых и средовых воздействиях, позволяющие учитывать реальные диаграммы деформирования конструкционных материалов, различные схемы развития коррозионных повреждений в границах прямоугольного поперечного сечения (в сжатой зоне, в растянутой зоне, у боковых граней), а также различную степень поврежденности сечений в пределах пролета. В расчете реализован метод заданных деформаций, в котором при определении напряженно-деформированного состояния сечения величина момента устанавливается по заданным значениям кривизны, а величина внешней нагрузки, действующей на балку, устанавливается по заданным значениям угла поворота на опоре.

3. Разработана методика проведения испытаний образцов железобетонных балок при длительных силовых и агрессивных средовых воздействиях, предусматривающая накопление коррозионных повреждений бетона и стальной арматуры.

4. При воздействии сульфатсодержащей агрессивной среды коэффициент повреждения поверхностного слоя бетона в переходной зоне не принимает значение равное нулю (по проведенным оценкам его минимальное значение составляет 0,15-0,2). Кинетика развития коррозионных повреждений бетона имеет затухающий с течением времени характер и зависит от знака и уровня действующих в нем напряжений.

5. В условиях полной нейтрализации защитных свойств бетона при воздействии хлоридсодержащей агрессивной среды у стальной арматуры классов А240 и А500 коррозионные повреждения (питтинги) наибольшей глубины могут образовываться на поверхности стрежня обратной по отношению к ближайшей грани сечения железобетонного элемента.

6. Получены новые экспериментальные данные по прочности и деформативности образцов железобетонных балок, находившихся длительное время под нагрузкой в лабораторных (сульфат- и хлоридсодержащих) и реальных эксплуатационных средах; балок, содержащих в растянутой зоне стеклопластиковую арматуру. Выявлены особенности напряженно-деформированного состояния образцов на всех этапах нагружения и характер их разрушения. Установлено снижение прочности нормальных сечений и возрастание прогибов образцов железобетонных балок с увеличением срока действия на них нагрузки и агрессивной среды. Определены параметры коррозионных повреждений бетона и стальной арматуры образцов в различные моменты времени.

7. Предлагаемая методика расчета прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, подверженных при эксплуатации длительным силовым и средовым воздействиям, имеет приемлемую точность. Это подтверждается совпадением соответствующих опытных и расчетных данных по образцам, использованным как в собственных, так и других (сопоставимых по теме) экспериментальных исследованиях.

8. Составлены практические рекомендации по прогнозированию изменения прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями с течением времени и оценке их остаточного ресурса.

9. Вследствие возрастающего количества случаев преждевременного исчерпания несущей способности железобетонных конструкций по причине накопления коррозионных повреждений материалов, назрела необходимость внесения в строительные нормы проектирования требований расчета и конструирования по новому (третьему) предельному состоянию с учетом долговечности, принимая во внимание проведенные исследования.

Дальнейшее развитие исследований, представленных в настоящей работе, связано с необходимостью совершенствования расчетной модели и методики расчета коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов на предмет учета возможной потери сцепления между бетоном и стальной арматурой, что позволит дополнить критерии наступления предельного состояния указанных элементов, а также даст возможность более надежно и достоверно оценивать их остаточный ресурс.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Смоляго Г.А. Моделирование величины коррозионных повреждений арматуры железобетонных конструкций в условиях хлоридной агрессивной среды / Г.А. Смоляго, А.В. Дронов, **Н.В. Фролов** // Известия Юго-Западного государственного университета. — **2017**. — № 1 (70). — С. 43-49.

2. Смоляго Г.А. Экспериментальные исследования конструкций сборных железобетонных перемычек наружных несущих стен общественного здания / Г.А. Смоляго, **Н.В. Фролов** // Известия Юго-Западного государственного университета. — **2018**. — № 5 (80). — С. 47-57.

3. Смоляго Г.А. Современные подходы к расчету остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями / Г.А. Смоляго, **Н.В. Фролов** // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. — **2019**. — № 6 (21). — С. 88-100.

4. **Фролов Н.В.** Экспериментальные исследования кинетики развития коррозионных повреждений бетона в изгибаемых железобетонных элементах при силовых и средовых воздействиях / Н.В. Фролов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. — **2020**. — № 2.— С. 34-43.

Публикации в издании, входящем в базу данных Scopus:

5. **Frolov N.V.** Bended reinforced concrete beams deformability under long-term and environmental influences [Деформативность железобетонных балок при длительных силовых и средовых воздействиях] / N.V. Frolov, G.A.

Smolyago // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — Vol. 896. — P. 012006. doi:10.1088/1757-899X/896/1/012006

Публикации в других изданиях:

6. Смоляго Г.А. Методика и программа проведения экспериментальных исследований изгибаемых железобетонных элементов при силовом и средовом воздействии / Г.А. Смоляго, **Н.В. Фролов** // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений. — Курск. гос. ун-т. (Курск), 2017. — С. 135-138.

7. **Фролов Н.В.** Экспериментальные исследования анкеровки стержневой стеклопластиковой арматуры в изгибаемых армобетонных элементах / Н.В. Фролов, Г.А. Смоляго // Безопасный и комфортный город: сборник научных трудов по материалам I международной научно-практической конференции молодых учёных. — ОГУ им. И.С. Тургенева (Орел), 2017. — С. 143-147.

8. Смоляго Г.А. Расчет деформативности изгибаемых железобетонных элементов переменной жесткости / Г.А. Смоляго, А.Е. Жданов, Я.Л. Ищук, **Н.В. Фролов** // «Лолейтовские чтения – 150». Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям: сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию А.Ф. Лолейта. — Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2018. — С. 385-390.

9. **Фролов Н.В.** Анализ влияния уровня и знака напряжений на развитие коррозионных повреждений бетона / Н.В. Фролов, Г.А. Смоляго // Наука и инновации в строительстве: сборник докладов III Международной научно-практической конференции. — БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород), 2019. С. 132-136.

10. **Фролов Н.В.** Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями бетона сжатой зоны / Н.В. Фролов, Г.А. Смоляго // Безопасный и комфортный город: сборник научных трудов по материалам III всероссийской научно-практической конференции молодых учёных. — ОГУ им. И.С. Тургенева (Орел), 2019. — С. 121-127.

11. **Фролов Н.В.** Расчет прочности нормальных сечений коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов на основе предельных усилий / Н.Ф. Фролов, Г.А. Смоляго // Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции. — ЮЗГУ (Курск), 2019. — С. 272-276.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. «Программа для расчета однопролетной балки переменной жесткости»

/ Г.А. Смоляго, Н.А. Смоляго, **Н.В. Фролов**, Я.Л. Ищук; заявитель и правообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. - № 2019619649; Заявл. 10.07.2019; опубл. 22.07.2019.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. «Программа для построения диаграмм деформирования бетона и арматуры с учетом коррозионных повреждений» / Г.А. Смоляго, Н.А. Смоляго, **Н.В. Фролов**, Я.Л. Ищук; заявитель и правообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. - № 2019665479; Заявл. 13.10.2019; опубл. 22.10.2019.

Личный вклад автора состоит в совершенствовании методики расчета прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов, подверженных длительным силовым и средовым воздействиям; составлении алгоритма и написании программ расчета для ЭВМ; сборе и анализе материалов по исследуемой теме; постановке задач исследования и выборе методов их решения; подготовке и проведении экспериментальных исследований; обобщении опытных данных и проведении численных исследований; составлении практических рекомендаций; формулировке основных положений, определяющих научную новизну.

Автор выражает благодарность доцентам Жданову А.Е. и Мигунову В.Н. за отдельные научные консультации, а так же научному руководителю, профессору Смоляго Г.А. за оказанную поддержку в выполнении работы и предоставленный для исследований исходный материал.

Подписано в печать 10.10.2020 г. Формат 60x84/16
Усл. печ. л. 1,0 Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46